

# Analyse Multi-échelle du Comportement Hygrothermique des Matériaux de Construction Biosourcés

Amer BAKKOUR

Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal, Clermont-Ferrand, France

**RESUME** L'utilisation de matériaux biosourcés offre une solution écologique pour réduire la consommation énergétique des bâtiments. Cependant, leur adoption reste limitée par une méconnaissance et de leurs performances hygrothermiques comparées aux matériaux conventionnels. Cette étude vise à relever ces défis en analysant la performance hygrothermique des matériaux biosourcés à trois échelles : matériau, paroi et bâtiment. À l'échelle du matériau, les propriétés hygrothermiques de divers bétons et panneaux isolants biosourcés – comme ceux à base de chanvre, de lin, de bois, etc. –, sont examinées à partir de données issues de la littérature. Ces matériaux présentent d'excellentes performances thermiques, avec une conductivité thermique de  $0,07$  à  $0,22 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  pour les bétons et de  $0,04$  à  $0,07 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  pour les panneaux. Parmi ces matériaux, le béton de bois a été sélectionné pour une analyse approfondie aux échelles de la paroi et du bâtiment. À l'échelle de la paroi, une modélisation numérique compare les performances hygrothermiques de murs en béton de bois et en béton C12/15 sous climats tempéré (La Rochelle, France) et désertique chaud (Le Caire, Égypte). Le béton de bois réduit la température au centre du mur jusqu'à  $1,5 \text{ °C}$  (La Rochelle) et  $1,8 \text{ °C}$  (Le Caire). À l'échelle du bâtiment, deux configurations sont analysées : (1) murs non isolés de même épaisseur, et (2) résistances thermiques équivalentes via isolation ajoutée au béton C12/15. Dans la première configuration, le béton de bois affiche une meilleure performance que le béton C12/15 non isolé. Cependant, le béton C12/15 isolé, bénéficiant d'une masse thermique plus élevée, affiche une performance supérieure.

**Mots-clefs** Construction durable, Matériaux biosourcés, Efficacité énergétique

## I. INTRODUCTION

La croissance de la consommation mondiale d'énergie a accéléré pour atteindre  $2,2 \%$  en 2023, un rythme significativement plus rapide que la croissance annuelle moyenne de  $1,5 \%$  enregistrée entre 2010 et 2019 (World Energy Consumption Statistics, 2024). Une part importante de cette énergie, environ  $34 \%$ , a été consacrée à assurer le confort thermique, selon le Programme des Nations Unies pour l'environnement (United Nations Environment Programme, 2024). Dans ce contexte, le secteur de la construction se distingue comme un contributeur majeur à la consommation énergétique et à la pollution. Pour répondre à ces problématiques, des efforts considérables sont en cours pour réduire les besoins énergétiques des bâtiments, améliorer la qualité de l'air intérieur et minimiser leur impact environnemental.

Les matériaux biosourcés offrent de nombreux avantages durables, notamment leur caractère renouvelable, recyclable et biodégradable, ce qui en fait un élément clé des pratiques de construction respectueuses de l'environnement. Selon leur formulation, ils peuvent être utilisés comme panneaux isolants thermiques ou intégrés dans des compositions de béton. Le secteur de la construction a vu émerger des matériaux composites innovants associant fibres et/ou granulats végétaux, tels que le béton de chanvre (Bardouh et al., 2024), la paille (Tlajji et al., 2022), le béton de bois (Bakkour et al., 2023), etc.

Les solutions qui intègrent des concepts inspirés de la nature dans la conception urbaine, jouent un rôle central dans ces avancées. Parmi les approches clés figurent les toitures végétalisées (Ouldboukhité et al., 2024), qui offrent une isolation naturelle et réduisent l'effet d'îlot de chaleur urbain ; les systèmes de végétalisation verticale, comme les murs végétaux (Bustami et al., 2018), qui améliorent la régulation thermique et l'esthétique ; et les matériaux de construction biosourcés, reconnus pour leur faible énergie grise, leurs excellentes propriétés isolantes et leur bonne capacité à réguler l'humidité (Bakkour et al., 2024).

Cet article propose une analyse multi-échelle des propriétés hygrothermiques des matériaux à base végétale. À l'échelle du matériau, la conductivité thermique et la valeur de tampon hydrique (MBV) de divers bétons et panneaux isolants biosourcés sont examinées à partir de données issues de la littérature. Parmi ces matériaux, le béton de bois est sélectionné pour une analyse approfondie aux échelles de la paroi et du bâtiment. À l'échelle de la paroi, une modélisation numérique compare le comportement hygrothermique de deux murs d'épaisseur identique (30 cm) : l'un en béton de bois et l'autre en béton conventionnel C12/15. Ces murs sont soumis à des conditions climatiques variées, avec des conditions intérieures définies en fonction de l'usage du bâtiment. À l'échelle du bâtiment, la modélisation numérique est étendue pour évaluer la performance énergétique d'un bâtiment en béton de bois par rapport à un bâtiment conventionnel, en se concentrant sur la consommation d'énergie pour le chauffage et le refroidissement. Cette approche multi-échelle vise à soutenir l'intégration pratique des matériaux biosourcés dans la construction durable et à promouvoir l'adoption de pratiques de construction écologiques.

## II. MATERIAUX COMPOSITES BIOSOURCES

Les granulats et fibres d'origine végétale sont largement utilisés dans la construction sous diverses formes, telles que des panneaux d'isolation thermique fabriqués à partir de fibres ou de granulats végétaux, ainsi que des charges ou des matériaux de renforcement dans les structures en béton.

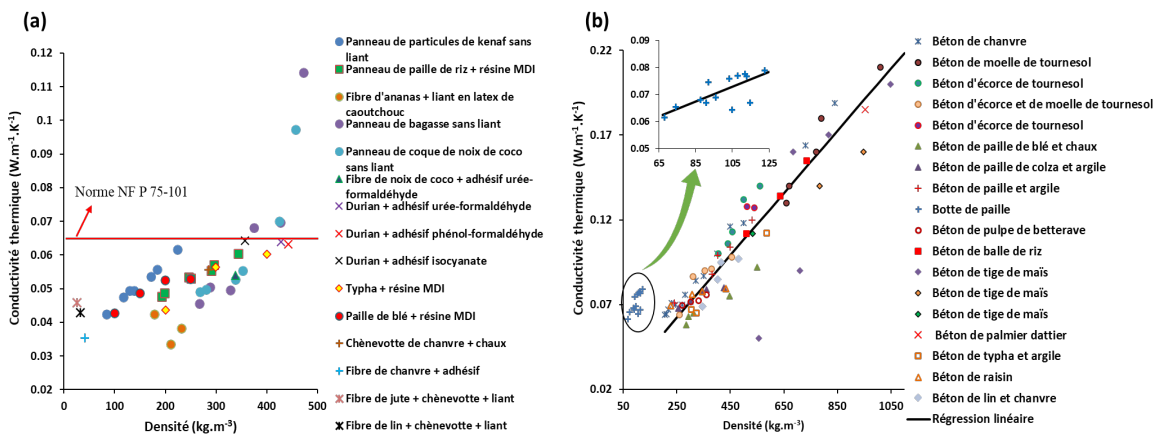
En effet, les panneaux biosourcés ont émergé comme une alternative durable aux composites inorganiques et synthétiques dans les applications d'isolation thermique. Ils peuvent être produits à l'aide de liants naturels ou synthétiques, ou alternativement, être formés sans aucun liant par une technique de pressage à chaud. D'autre part, les bétons biosourcés sont constitués d'une combinaison de particules ou de fibres végétales et d'un liant. Ils peuvent être classés selon le type de charge incorporée. Dans la première catégorie, les granulats végétaux constituent une partie ou la totalité du volume en vrac du béton. Dans la seconde catégorie, les fibres végétales sont introduites comme renfort pour améliorer les performances mécaniques des bétons.

### A. Conductivité thermique

La littérature souligne une relation claire entre la conductivité thermique et la densité des divers matériaux composites, comme l'illustre dans la **FIGURE 1** (extrait de notre article publié, Bakkour et al., 2024). Cette relation est particulièrement observable pour les panneaux d'isolation biosourcés et les bétons végétaux.

Pour les panneaux d'isolation biosourcés, des facteurs tels que la pression de compression appliquée pendant la fabrication et la teneur en liant influencent considérablement la conductivité thermique. Les panneaux ayant des densités plus élevées présentent généralement une efficacité d'isolation réduite, en raison de la diminution du nombre de vides remplis d'air causée par la compression. Les valeurs de conductivité thermique des panneaux végétaux ( $0,04$  à  $0,07 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) satisfont aux critères de la norme française NF P75-101, qui qualifie un matériau d'isolant pour une conductivité thermique inférieure à  $0,065 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Cette caractérisation se limite aux propriétés intrinsèques des matériaux, indépendamment de leur épaisseur ou de leur configuration dans un bâtiment.

De même, pour les bétons biosourcés, la conductivité thermique augmente avec la densité, principalement en raison de la densification de leur structure poreuse. Cette densification réduit leurs propriétés isolantes, reflétant une relation croissante entre la densité sèche et la conductivité thermique. Bien que cette relation puisse être approximativement linéaire dans certaines plages de densité, elle est généralement plus complexe et dépend fortement de la microstructure poreuse du matériau ainsi que de la proportion d'air emprisonné.



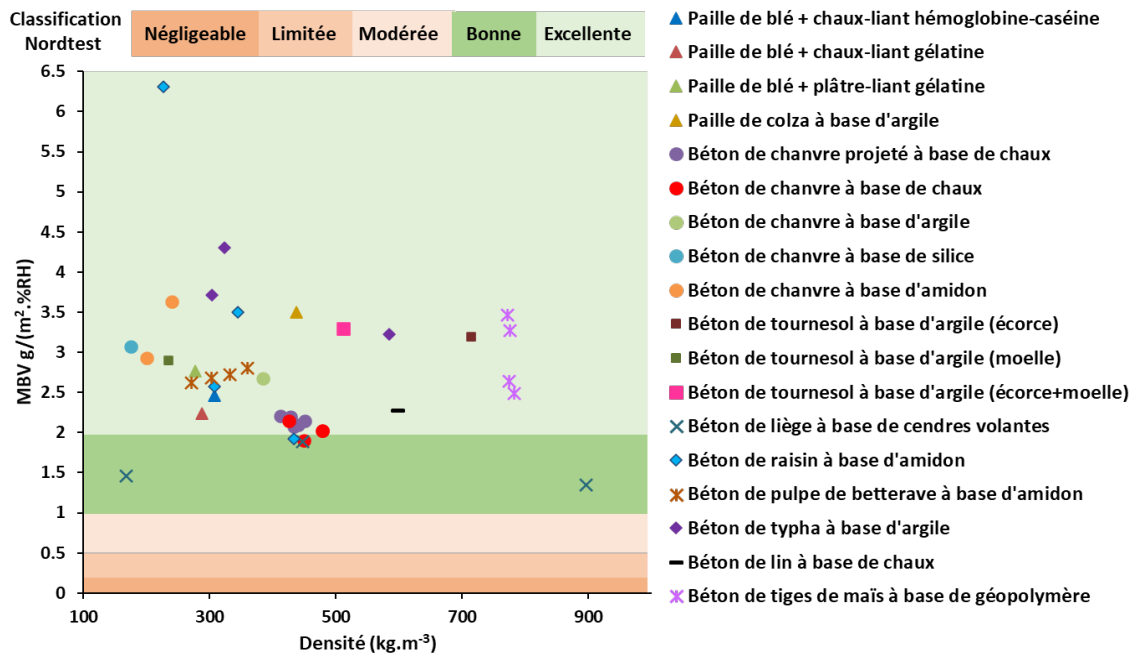
**FIGURE 1.** Conductivité thermique de divers composites à base végétale en fonction de la densité sèche : (a) panneaux d'isolation et (b) bétons (Bakkour et al., 2024)

De plus, la température joue un rôle important dans l'impact sur les propriétés d'isolation thermique des composites biosourcés, entraînant souvent une réduction de leur performance globale (Bakkour et al., 2024). En outre, les matériaux bruts d'origine végétale sont naturellement sensibles à l'humidité ambiante. Cette sensibilité entraîne des fluctuations dans la teneur en humidité des matériaux, ce qui augmente leur conductivité thermique en remplaçant les vides d'air isolants par de l'humidité, réduisant ainsi leur efficacité en tant qu'isolants thermiques.

### B. Valeur de tampon hydrique (MBV)

Les données issues de la littérature présentées dans la **FIGURE 2**, extraites de l'article de synthèse sur les matériaux biosourcés (Bakkour et al., 2024), sont basées sur les protocoles de mesure de la norme NORDTEST (Rode et al., 2005). Ces données indiquent que les bétons végétaux présentent des valeurs de tampon hydrique (MBV) supérieures à 2 g/(m<sup>2</sup>·%HR), ce qui les classe parmi les excellents régulateurs hydriques. En revanche, les bétons conventionnels présentent des valeurs de MBV beaucoup plus faibles, telles que 0,35 g/(m<sup>2</sup>·%HR) pour le béton ordinaire et 0,96 g/(m<sup>2</sup>·%HR) pour le béton cellulaire, les classant ainsi comme des régulateurs d'humidité négligeables.

En effet, le MBV représente la capacité d'un matériau à absorber ou à libérer de l'humidité lorsqu'il est exposé à des fluctuations d'humidité relative. Un MBV plus élevé signifie une meilleure capacité à modérer les oscillations de l'humidité relative de l'air intérieur, ce qui rend les bétons végétaux particulièrement efficaces pour stabiliser le taux d'humidité.



**FIGURE 2.** Valeurs MBV des différents bétons végétaux (Bakkour et al., 2024)

Les données issues de la littérature mettent en évidence l'excellente capacité d'isolation thermique des matériaux biosourcés ainsi que leur efficacité en tant que régulateurs de l'humidité. Ces propriétés font d'eux des solutions écologiques particulièrement adaptées aux applications dans le secteur du bâtiment, avec un potentiel notable pour améliorer la performance énergétique des bâtiments. Parmi ces matériaux, le béton de bois est choisi pour une analyse approfondie dans les sections suivantes, où son comportement sera étudié aux échelles de la paroi et du bâtiment. Ce choix est justifié par le manque de documentation sur ce matériau dans la littérature, ce qui rend pertinente une comparaison de ses performances avec celles des matériaux conventionnels.

### III. MURS BIOSOURCES : ÉTUDE DE CAS SUR LES COMPOSITES BOIS-CIMENT

Cette section a pour objectif de comparer numériquement la performance thermique d'un mur en béton de bois à celle d'un mur conventionnel en C12/15, sous différentes conditions climatiques.

Le béton de bois étudié ici est un composite biosourcé composé d'agrégats de bois provenant d'exploitants forestiers français labellisés PEFC (Programme de reconnaissance des certifications forestières) associés à un liant cimentaire (CEM I 42.5R). Pour améliorer l'adhérence entre les agrégats de bois et la matrice cimentaire, les agrégats ont été préalablement imprégnés avec le même type de liant cimentaire. Ce traitement préliminaire renforce la liaison au sein du composite, garantissant de meilleures performances mécaniques. La [FIGURE 3](#) présente les spécimens de béton de bois sous différentes formes.



**FIGURE 3.** Les bétons de bois préparés sous deux formes géométriques : cubique et parallélépipédique

Le modèle réduit de transfert de chaleur, d'air et d'humidité (R-HAM) est utilisé pour prédire les performances hygrothermiques des murs. Contrairement aux modèles trouvés dans la littérature, qui comportent souvent un grand nombre de paramètres difficiles à identifier, ce modèle simplifié se distingue par un nombre réduit de paramètres d'entrée. Cette simplification a été rendue possible grâce à une analyse de sensibilité paramétrique réalisée par Benkhaled et al. (2022). Cette analyse visait à établir des corrélations entre les propriétés hygrothermiques des composites biosourcés et les principaux potentiels de transfert : température  $T$ , pression de vapeur  $P_v$ , et pression totale  $P$ . À travers cette approche, les paramètres les plus critiques ont été identifiés : conductivité thermique  $\lambda$ , chaleur spécifique  $C_p$ , capacité de stockage d'eau  $C_m$ , et perméabilité à la vapeur d'eau  $K_m$ . Les paramètres ayant un impact négligeable sur le comportement hygrothermique ont été exclus. Cette méthodologie permet ainsi de réduire les incertitudes liées aux données d'entrée, un défi souvent rencontré avec les matériaux biosourcés dans les modèles standards.

Le modèle R-HAM a par ailleurs été validé expérimentalement pour plusieurs matériaux biosourcés, notamment le béton de chanvre (Benkhaled et al., 2022), les composites à base de paille (Bakkour et al., 2025a) et le béton de bois (Bakkour et al., 2023), confirmant sa précision dans des contextes hygrothermiques variés. Le modèle R-HAM est exprimé comme suit :

$$C_p \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}[\lambda \nabla T] + L_v \rho_s C_m \frac{\partial P_v}{\partial t} \quad (1)$$

$$\rho_s C_m \frac{\partial P_v}{\partial t} = \text{div}[K_m \nabla P_v] \quad (2)$$

où  $\rho_s$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] représente la densité,  $C_p$  [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] la capacité calorifique spécifique,  $\lambda$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] la conductivité thermique,  $L_v = 2,5 \times 10^6$  [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] la chaleur latente,  $C_m = \left(\frac{\partial \omega}{\partial \varphi}\right) \left(\frac{1}{P_{vsat}}\right)$  [ $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$ ] la capacité de stockage d'humidité,  $\varphi$  [%] l'humidité relative,  $\omega$  [ $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] la teneur en eau du matériau, et  $K_m$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$ ] la perméabilité totale à l'humidité.

Ce modèle a été discrétisé à l'aide de la méthode des éléments finis et implémenté dans MATLAB, comme expliqué en détail dans Bakkour et al. (2025a). Cette approche « white box » offre une transparence totale des équations et des paramètres, contrairement aux outils commerciaux tels que WUFI ou Delphin, qui fonctionnent comme des « boîtes noires » avec des équations et des paramètres souvent surspécifiés.

Les propriétés du béton C12/15 sont extraites de la base de données du logiciel WUFI, tandis que celles du béton de bois sont issues de notre étude numérique et expérimentale (Bakkour et al., 2025b). Les propriétés physiques et hygrothermiques des matériaux utilisés dans cette étude sont résumées dans le tableau 1.

**TABLEAU 1.** Propriétés physiques et hygrothermiques du béton C12/15 et du béton de bois

Matériaux étudiés	$\rho_s$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	$C_p$ [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	$\mu$ [-]	$C_m$ (la valeur moyenne) [ $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$ ]
Béton C12/15	2200	1,6	850	92	-
Béton de bois	612	0,14	1007	10	$2,5 \times 10^{-6}$

Pour une comparaison équitable à l'échelle de la paroi, les deux murs ont été conçus avec une épaisseur identique de 30 cm, correspondant à des dimensions couramment utilisées dans les constructions modernes. Ce choix permet de se concentrer sur les propriétés intrinsèques des matériaux biosourcés et conventionnels, sans introduire de complexité géométrique. Une comparaison basée sur une résistance thermique ( $R_{th}$ ) identique aurait nécessité l'utilisation d'épaisseurs irréalistes pour certains matériaux ou l'ajout d'isolants supplémentaires. Par conséquent, l'objectif principal reste de mettre en avant les propriétés intrinsèques des matériaux biosourcés par rapport aux matériaux conventionnels, en utilisant une épaisseur fixe qui reflète les pratiques constructives standardisées.

Les deux murs sont exposés à des conditions limites représentant les environnements atmosphériques typiques de deux climats : le climat désertique chaud (Le Caire, Égypte) et le climat tempéré (La Rochelle, France). Cette approche garantit que l'analyse prenne en compte l'influence des diverses conditions climatiques sur les performances des murs. Les données climatiques extérieures sont issues de fichiers météorologiques réels, retirés du projet 'Building Simulation Climate Data' ("Climate data for cities worldwide," n.d.) pour le Caire et du fichier TRNSYS pour La Rochelle. En outre, les valeurs de température et d'humidité relative de l'air intérieur sont définies en fonction de l'utilisation prévue du bâtiment, afin de simuler des conditions environnementales intérieures réalistes pour l'évaluation du comportement thermique et hygrothermique des murs.

Les conditions aux limites pour le flux de chaleur ( $q$ ) et le flux massique ( $g$ ) à la surface sont décrits par les équations suivantes :

$$q = h(T_{air} - T_{surface}) \quad (3)$$

$$g = h_m(P_{v,air} - P_{v,surface}) \quad (4)$$

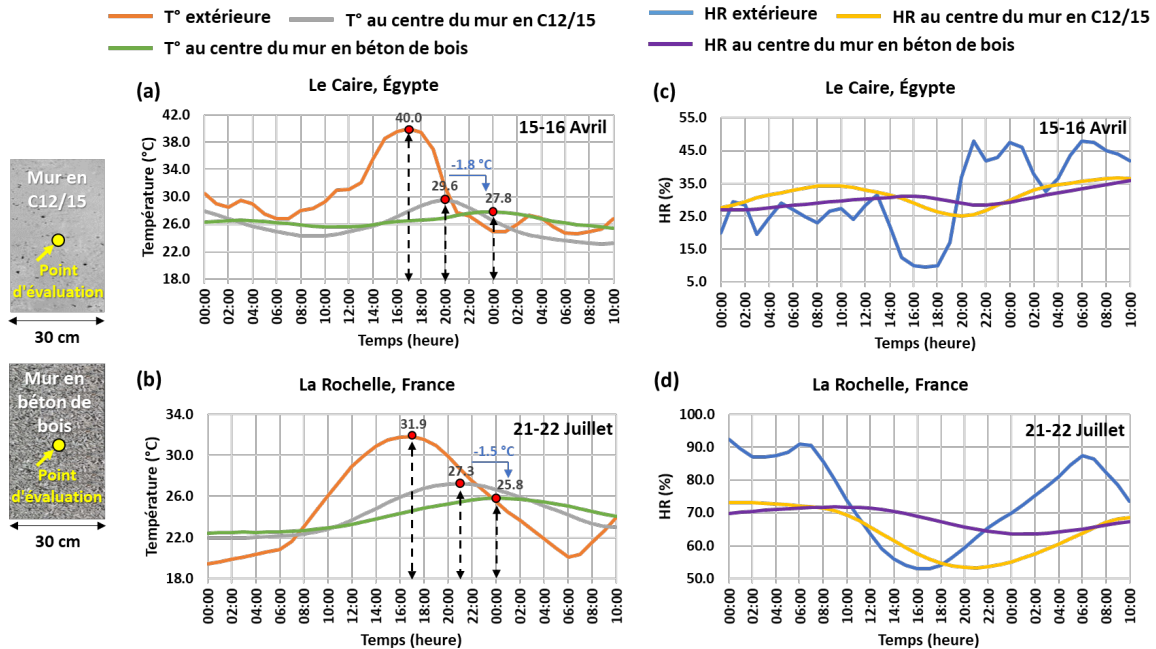
où :  $h$  [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ] représente le coefficient de transfert de chaleur convectif et  $h_m$  [ $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$ ] représente le coefficient de transfert massique convectif. Les valeurs constantes de  $h$  ont été adoptées  $25 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$  pour les conditions extérieures et  $8 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$  pour les conditions intérieures. Ces valeurs sont conformes aux recommandations de la norme internationale NF EN ISO 6946 (2017), utilisée pour le calcul du coefficient de transmission thermique ( $U$ ) des composants de construction.

Pour mettre en évidence le rôle important du mur en béton de bois dans le maintien du confort thermique, notamment pendant une période chaude, une simulation sur une période d'une semaine a été réalisée pour chaque climat étudié. L'analyse se focalise ensuite sur une fenêtre de 36 heures située au milieu de cette période de simulation : du 15 au 16 avril pour le Caire et du 21 au 22 juillet pour La Rochelle. Cette approche garantit que les effets des conditions initiales sont minimisés, car le système atteint un régime quasi-stable avant le début de la fenêtre d'analyse. Ces périodes ont été sélectionnées en raison des températures extérieures élevées typiques de ces saisons, qui constituent un facteur déterminant pour évaluer les performances thermiques des matériaux. Les pics de température extérieure représentent des conditions extrêmes qui mettent en lumière la capacité des matériaux à atténuer les transferts de chaleur et à maintenir un environnement intérieur stable.

Bien que les apports solaires puissent influencer les transferts de chaleur, leur impact dépend fortement de paramètres spécifiques tels que l'orientation des façades, les propriétés radiatives de surface (albédo) et les systèmes d'ombrage. Ces variables ne sont pas prises en compte dans cette analyse simplifiée, car notre objectif est de comparer directement les capacités intrinsèques des matériaux à résister aux températures élevées. Cette approche garantit une évaluation équitable des performances thermiques des murs sous des conditions climatiques extrêmes, en se concentrant sur l'impact des températures extérieures comme indicateur principal.

De plus, bien que les deux murs (béton de bois et béton C12/15) aient été soumis à des conditions environnementales intérieures et extérieures strictement identiques, les températures et humidités des surfaces intérieure et extérieure des murs restent influencées par ces conditions. Par conséquent, l'analyse des performances thermiques au niveau des surfaces ne permet pas de garantir une comparaison équitable des propriétés intrinsèques des matériaux. Pour minimiser cet effet, l'évaluation des performances thermiques a été réalisée au centre du mur, situé à une profondeur de 15 cm. Cette position neutre permet de mieux mettre en évidence les effets de l'inertie thermique et de la capacité d'atténuation des matériaux, fournissant une représentation précise et objective du comportement thermique global du matériau.

La [FIGURE 4](#) montre les variations de température et d'humidité au centre des murs en béton de bois et en béton conventionnel (C12/15) pour deux climats : La Rochelle et Le Caire.



**FIGURE 4.** Variations de température (a, b) et d'humidité (c, d) au centre des murs en béton de bois et béton conventionnel (C12/15) pour deux climats : La Rochelle et Le Caire

La réponse thermique du mur en béton C12/15 diffère significativement de celle du mur en béton de bois. Ce dernier offre une performance supérieure en retardant et en atténuant le transfert de chaleur, permettant une réduction supplémentaire de la température au centre du mur de jusqu'à 1,5 °C dans le climat tempéré (La Rochelle, France) et de 1,8 °C dans le climat désertique chaud (Le Caire, Égypte), par rapport au mur conventionnel en béton C12/15. Dans tous les cas, les températures internes du mur en béton C12/15 sont plus élevées et atteignent leur maximum plus rapidement que celles du mur biosourcé. De plus, les pics de température au centre du mur se produisent lorsque les températures extérieures commencent à diminuer, notamment durant la nuit. Cette particularité est attribuée à la faible conductivité thermique du mur en béton de bois, qui limite efficacement le transfert de chaleur.

Par ailleurs, une analyse supplémentaire sur l'humidité au centre des murs met en évidence la supériorité du béton de bois en termes de régulation hydrique par rapport au béton conventionnel C12/15. Comme le montre la FIGURE 4, les variations d'humidité dans le béton de bois sont nettement moins marquées et mieux contrôlées, en particulier dans un climat tempéré. Par exemple, lorsque l'humidité relative extérieure chute brutalement de 90 % à 50 %, l'humidité relative au centre du mur en béton C12/15 diminue de manière significative, passant de 70 % à 50 %. En revanche, le béton de bois conserve un taux d'humidité relativement stable, oscillant entre 70 % et 65 % dans les mêmes conditions. Cette stabilité est attribuée à la capacité de stockage d'eau élevée du béton de bois ( $C_m = 2,5 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$  en moyenne), qui joue un rôle clé dans sa régulation hygrométrique. Ce matériau absorbe et libère progressivement l'humidité en fonction des fluctuations environnementales, atténuant ainsi les variations brutales d'humidité.

#### IV. BATIMENTS BIOSOURCÉS : APPLICATION DU BETON DE BOIS

L'objectif de cette étude de cas est d'évaluer l'influence des matériaux biosourcés sur la performance énergétique des bâtiments. Pour cela, deux analyses comparatives sont menées entre un bâtiment construit en béton de bois et un autre en béton conventionnel C12/15.

La première comparaison vise à examiner l'impact direct du remplacement d'un béton non isolé par un béton biosourcé, en maintenant une épaisseur identique des murs extérieurs. Les deux bâtiments ont ainsi des murs extérieurs de 30 cm d'épaisseur et des murs de séparation intérieurs de 20 cm. Les planchers bas et hauts du bâtiment en béton de bois sont également d'une épaisseur de 30 cm, avec un coefficient de transmission thermique  $U = 0,448 \text{ W/m}^2\text{K}$ . En comparaison, le bâtiment en béton C12/15 présente des planchers de 26 cm, isolés par une couche de polystyrène expansé (EPS) de 9,5 cm afin d'assurer une performance thermique équivalente.

Une seconde analyse est menée à l'échelle du bâtiment en imposant une résistance thermique équivalente entre les deux cas. Dans ce scénario, tous les murs extérieurs, ainsi que les planchers bas et hauts, sont constitués d'une structure en béton C12/15 de 26 cm, associée à une isolation EPS de 9,5 cm. Cette configuration permet d'atteindre la même résistance thermique que celle du béton de bois de 30 cm.

L'étude porte sur un bâtiment de plain-pied comprenant deux chambres, une salle de bains et un salon, comme illustré dans la FIGURE 5. Les fenêtres présentent un coefficient de transmission thermique  $U = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$  et un facteur solaire (g-glazing) de 62 %. Aucune source de chaleur interne (équipements, occupants, éclairage) n'est prise en compte dans les simulations, afin d'isoler l'effet de l'enveloppe sur la performance énergétique. Ainsi, le profil d'utilisation considéré suppose un bâtiment inoccupé.

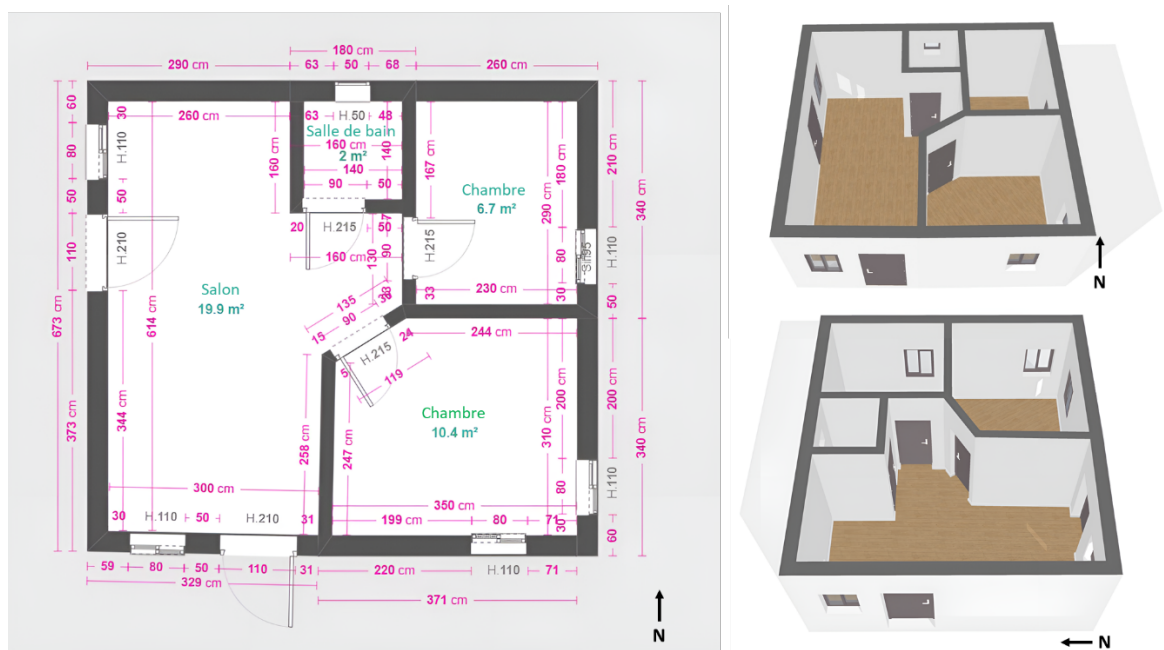


FIGURE 5. Plan 2D et modèle 3D du bâtiment de l'étude de cas

Dans cette étude de cas, la température intérieure est maintenue à 18 °C pendant la période de chauffage et à 26 °C pendant la période de refroidissement, avec une humidité relative contrôlée entre 40 % et 60 %. Aucune génération interne de chaleur ou d'humidité n'est prise en compte, tandis que le débit de renouvellement d'air a été ajusté pour refléter des conditions plus réalistes. Le débit total est fixé à 135 m<sup>3</sup>/h, réparti comme suit : 25 m<sup>3</sup>/h pour chaque chambre, 15 m<sup>3</sup>/h pour la salle de bains, et 70 m<sup>3</sup>/h pour le salon. Cette approche garantit une simulation mieux alignée avec les besoins réels de ventilation dans ce type de logement. L'étude se concentre sur deux climats distincts : le climat océanique tempéré de La Rochelle, France, et le climat désertique chaud du Caire, Égypte. Les simulations sont réalisées sur une période d'un an, avec un pas de temps d'une heure.

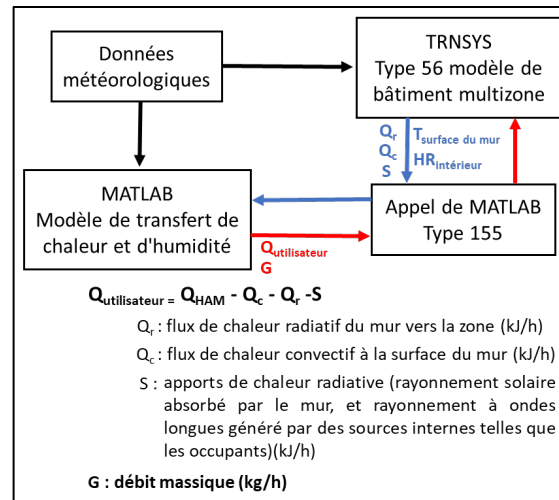
Le logiciel TRNSYS est utilisé pour effectuer la simulation. Pour prédire avec précision le comportement hygrothermique de l'enveloppe du bâtiment en béton de bois, le modèle réduit de transfert de chaleur, d'air et d'humidité (R-HAM) décrit dans les équations (1) et (2) est adopté. Le modèle est discrétisé à l'aide de la méthode des éléments finis, implémentée dans MATLAB, et intégré dans TRNSYS via le module Type 155, qui facilite l'échange de données entre ces deux logiciels, comme illustré sur la [FIGURE 6](#).

À chaque pas de temps, TRNSYS détermine les conditions aux limites des faces internes et externes du mur. Ces données sont ensuite transmises à MATLAB afin de résoudre le modèle HAM. Dans ce processus, les températures des surfaces intérieure et extérieure ( $T_{si}$  et  $T_{se}$ ), ainsi que les pressions partielles de vapeur ( $P_{vi}$  et  $P_{ve}$ ), sont utilisées comme conditions aux limites pour les murs hygroscopiques.

Le flux de chaleur conductif, évalué à l'aide de TRNSYS, regroupe plusieurs composantes essentielles. Il inclut le flux convectif entre la surface intérieure du mur et la zone ( $Q_c$ ), le flux radiatif du mur vers la zone ( $Q_r$ ), une contribution énergétique spécifiée par l'utilisateur appliquée à la surface intérieure du mur ( $Q_{utilisateur}$ ), ainsi que les apports de chaleur radiative ( $S$ ). Ces apports radiatifs correspondent au rayonnement solaire traversant les fenêtres et absorbé par le mur, ainsi qu'aux gains thermiques internes (rayonnement à ondes longues) produits par des sources telles que les occupants ou les équipements.

En outre, un flux de chaleur supplémentaire, positif ou négatif, est introduit pour représenter la dissipation de la chaleur latente à l'intérieur du mur. Ce flux est déterminé par le modèle R-HAM couplé à TRNSYS, ajusté au début de chaque pas de temps, et défini conformément à l'équation 5.

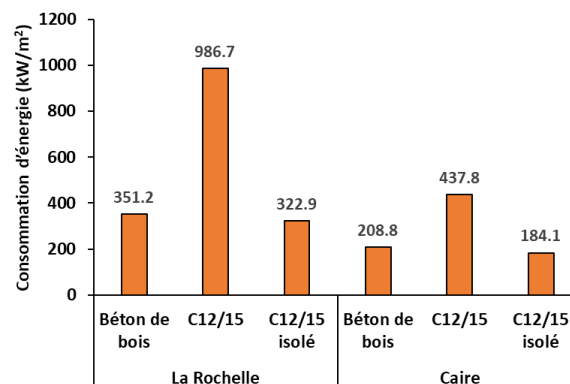
$$Q_{utilisateur} = Q_{HAM} - (Q_c + Q_r + S) \quad (5)$$



**FIGURE 6.** Co-simulation entre MATLAB et TRNSYS

La **FIGURE 7** montre la consommation énergétique du bâtiment de l'étude de cas pour les différents murs dans chaque climat considéré. Ces résultats montrent une variation de la consommation en fonction du matériau et du climat considéré.

Dans le climat tempéré de La Rochelle, le béton de bois démontre une efficacité énergétique notable pour réduire les besoins en énergie, en raison de sa faible conductivité thermique ( $0,14 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). La demande énergétique totale pour le bâtiment doté de murs en béton de bois est de  $351,2 \text{ kWh/m}^2$ , nettement inférieure à celle de  $986,7 \text{ kWh/m}^2$  enregistrée pour le bâtiment en béton C12/15 non isolé. Cela met en évidence les propriétés d'isolation supérieures du béton de bois dans un climat où les besoins en chauffage sont prédominants. Ce matériau limite les transferts thermiques, ce qui réduit la pénétration des flux de chaleur et, par conséquent, la demande énergétique. Cependant, lorsque le bâtiment en béton C12/15 est isolé par une couche de  $9,5 \text{ cm}$  de polystyrène expansé (EPS), de manière à atteindre une résistance thermique globale équivalente à celle du béton de bois, il présente de meilleures performances. Cette amélioration s'explique par la forte masse thermique du béton C12/15, qui lui permet de stocker la chaleur le jour et de la restituer la nuit, réduisant ainsi les besoins de chauffage.



**FIGURE 7.** Comparaison des besoins énergétiques (climatisation + chauffage) entre les bâtiments en béton de bois et de référence

Dans le climat chaud du Caire, où la climatisation représente la majeure partie de la consommation énergétique, le béton de bois se révèle également avantageux. Ses excellentes propriétés d'isolation limitent les gains de chaleur, ce qui permet de réduire la demande énergétique à 208,8 kWh/m<sup>2</sup>, contre 437,8 kWh/m<sup>2</sup> pour le bâtiment en béton C12/15 non isolé. Bien que la masse thermique du béton C12/15 puisse absorber une partie de la chaleur, sa conductivité thermique élevée (1,6 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>) favorise la pénétration des flux thermiques, entraînant une hausse des besoins de refroidissement pendant les périodes de forte chaleur. Toutefois, lorsque le bâtiment en béton C12/15 est isolé, il offre de meilleures performances que le béton de bois, avec une demande énergétique réduite à 184,1 kWh/m<sup>2</sup>. En dépit d'une résistance thermique équivalente, la forte densité (2200 kg/m<sup>3</sup>) et l'inertie thermique du béton C12/15 permettent de lisser les variations de température, assurant un confort intérieur accru avec une consommation énergétique minimale.

En résumé, le béton de bois présente une performance énergétique avantageuse dans le cas de bâtiments non isolés, grâce à sa faible conductivité thermique qui limite les transferts de chaleur. Toutefois, lorsque le bâtiment en béton C12/15 est isolé de manière à atteindre une résistance thermique globale équivalente à celle du béton de bois, le béton C12/15 isolé surpasse le béton de bois, notamment en raison de sa masse thermique élevée, qui lui permet de réguler les variations de température intérieure dans les deux climats.

## V. CONCLUSION

Les matériaux biosourcés représentent une solution durable pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments tout en répondant aux exigences environnementales. Ils présentent de nombreux avantages écologiques, tels que la séquestration du carbone, la disponibilité locale, la renouvelabilité et la biodégradabilité. Cependant, leur adoption à grande échelle est freinée en raison d'une connaissance encore limitée de leurs propriétés intrinsèques et une compréhension insuffisante de leurs performances hygrothermiques par rapport aux matériaux de construction conventionnels.

Cette étude a examiné les propriétés hygrothermiques des matériaux biosourcés à plusieurs échelles : matériaux composites, murs et bâtiments. À l'échelle des matériaux composites, les propriétés hygrothermiques des bétons biosourcés et des panneaux d'isolation ont été examinées à partir de données issues de la littérature. Les résultats indiquent leur excellente capacité d'isolation thermique et leur efficacité à agir en tant que régulateurs hydriques, les qualifiant ainsi de solutions écologiques pour les applications dans la construction.

À l'échelle des murs, l'étude a montré que l'intégration de béton de bois dans les enveloppes des bâtiments réduit efficacement l'impact des fluctuations climatiques externes. Une étude de cas comparant des murs en béton de bois à des murs conventionnels en C12/15 a démontré que les matériaux biosourcés offrent une performance d'isolation thermique supérieure. Sous des conditions intérieures et extérieures strictement identiques, le béton de bois réduit la température au centre du mur de manière significative : jusqu'à 1,5 °C dans un climat tempéré (La Rochelle, France) et 1,8 °C dans un climat désertique chaud (Le Caire, Égypte), par rapport au béton C12/15.

À l'échelle du bâtiment, une étude numérique a analysé la performance énergétique de bâtiments avec des murs en béton de bois et en béton conventionnel C12/15 sous deux climats distincts :

tempéré (La Rochelle, France) et désert chaud (Le Caire, Égypte). L'analyse a été réalisée selon deux configurations comparatives. Dans la première configuration, les bâtiments ont été comparés avec des murs d'épaisseur identique de 30 cm. Les résultats montrent que le béton de bois, grâce à sa faible conductivité thermique ( $0,14 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), offre des performances énergétiques supérieures par rapport au béton conventionnel non isolé. À La Rochelle, le bâtiment en béton de bois affiche une demande énergétique totale de  $351,2 \text{ kWh/m}^2$ , contre  $986,7 \text{ kWh/m}^2$  pour le bâtiment en béton C12/15 non isolé. Dans le climat chaud du Caire, le béton de bois limite efficacement les gains de chaleur, réduisant la consommation énergétique à  $208,8 \text{ kWh/m}^2$ , comparé à  $437,8 \text{ kWh/m}^2$  pour le bâtiment en béton C12/15 non isolé. Dans une seconde configuration, où une isolation supplémentaire en polystyrène expansé (EPS) est ajoutée au bâtiment en béton C12/15 pour égaliser les résistances thermiques des parois, le bâtiment conventionnel bénéficie d'une capacité thermique plus élevée. Cette caractéristique lui permet de mieux absorber et diffuser la chaleur, améliorant ainsi ses performances énergétiques globales.

En perspective, il serait pertinent d'étudier l'influence des matériaux biosourcés à l'échelle micro-urbaine pour atténuer l'îlot de chaleur urbain (ICU). Les bâtiments biosourcés, grâce à leurs propriétés hygrothermiques (faible conductivité thermique et régulation de l'humidité), pourraient réduire l'absorption et la rétention de chaleur, contribuant ainsi à rafraîchir les environnements urbains. Une étude combinant simulations numériques et analyses de terrain permettrait d'évaluer leur impact sur les températures locales, le confort thermique et la durabilité urbaine. Cette approche ouvrirait de nouvelles voies pour des villes plus résilientes et écologiques.

## REFERENCES

- Bakkour, A., Ouldboukhite, S.-E., Biwole, P., Amziane, S., 2025a. Modeling heat and moisture transfer in bio-based wall structures using the finite element method: Application to straw walls in varied climatic conditions. *Journal of Building Engineering*, 104, 112263. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.112263>
- Bakkour, A., Ouldboukhite, S.-E., Biwole, P., Amziane, S., 2025b. Hygrothermal performance of wood-cement walls across various climate conditions. *Materials and Structures*, 58, 41. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02560-2>
- Bakkour, A., Ouldboukhite, S.-E., Biwole, P., Amziane, S., 2024. A review of multi-scale hygrothermal characteristics of plant-based building materials. *Construction and Building Materials*, 412, 134850. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134850>
- Bakkour, A., Ouldboukhite, S.-E., Biwole, P., Godi, G., Amziane, S., 2023. Experimental and Numerical Investigation of Hygrothermal Transfer through Bio-Based Materials: An Application to Wood-Cement Walls. *Buildings*, 13, 2986. <https://doi.org/10.3390/buildings13122986>
- Bardouh, R., Homoro, O., Reboul, N., Saidi, M., Amziane, S., 2024. Enhancing bio-based concrete mechanical properties: a novel approach with composite sandwiches and confined cylinders. *Materials and Structures*, 57, 139. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02400-3>
- Benkhaled, M., Ouldboukhite, S.-E., Bakkour, A., Amziane, S., 2022. Sensitivity analysis of the parameters for assessing a hygrothermal transfer model HAM in bio-based hemp concrete material. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 132, 105884. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.105884>

- Bustami, R.A., Belusko, M., Ward, J., Beecham, S., 2018. Vertical greenery systems: A systematic review of research trends. *Building and Environment*, 146, 226–237. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.045>
- Climate data for cities worldwide, n.d. URL <https://en.climate-data.org/>
- Ouldboukhite, S.-E., Bakkour, A., Amziane, S., Belarbi, R., 2024. A comparative study of energy performance of Green, White, and gravel roofs in a temperate climate through In-Situ measurement and dynamic simulation. *Energy and Buildings*, 320, 114630. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114630>
- Rode, C., Peuhkuri, R.H., Hansen, K.K., Time, B., Svennberg, K., Arfvidsson, J., Ojanen, T., 2005. NORDTEST Project on Moisture Buffer Value of Materials. AIVC 26th conference ‘Energy performance regulation’: Ventilation in relation to the energy performance of buildings, INIVE eeig 47–52.
- Tlaji, G., Ouldboukhite, S., Pennec, F., Biwole, P., 2022. Thermal and mechanical behavior of straw-based construction: A review. *Construction and Building Materials*, 316, 125915. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125915>
- United Nations Environment Programme, 2024. Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations - Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector. United Nations Environment Programme. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>
- World Energy Consumption Statistics - Yearbook 2024, Enerdata, n.d. URL <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html> (accessed 7.30.24).